

Memòria

FORN DE REDUCCIÓ DIRECTA "ELONKE"

(Bolvir, Baixa Cerdanya)



José Miguel Gallego Cañamero - arqueòleg
AREX, arqueologia experimental
Jansana 19, baixos 1^a, 08902, L'Hospitalet de Llobregat
www.artifexcrpa.com
Tel. 622 637 087

INDEX

1. Introducció
2. Descripció general dels forns de reducció directa
3. Descripció dels treballs de construcció
4. Consideracions finals
5. Annex fotogràfic
6. Bibliografia

1.- Introducció

Com a resultat de les successives campanyes d'excavació arqueològica endegades per part del Departament de Ciències de l'Antiguitat i l'Edat Mitjana de la Universitat Autònoma de Barcelona al jaciment del Castellot de Bolvir, es van exhumar restes corresponents a època ibèrica, a època romana republicana i a època baix medieval. Un cop arribats a una fase avançada de la recerca arqueològica, el següent objectiu havia de ser la posada en valor de l'assentament, la socialització dels coneixements adquirits i de les troballes arqueològiques.

En aquest sentit, el professor Jordi Cortadella i Morral, del mateix departament, es van posar en contacte amb els tècnics d'AREX, *arqueologia experimental*, secció d'ARTIFEX, *conservació i recreació del patrimoni arqueològic* (d'ara endavant ARTIFEX, *crpa*) amb la intenció de desenvolupar una activitat d'arqueologia experimental de portes obertes. Aquesta proposta va quedar emmarcada dintre del projecte *Paisajes de la Hispania romana. De la diversidad a la complementariedad* (HAR2013-41629-P), i (PATCA) *Castellot de Bolvir, Turó de Baltarga (Bellver de Cerdanya), Les Guilleteres d'All (Isòvol), Prospeccions Arqueològiques a la Cerdanya i l'Alt Urgell*.

Aquesta proposta giraria entorn de les fases inicials de la metal·lúrgia del ferro durant època ibèrica, entre els segles IV i II aC, i dels processos perifèrics, com ara el carboneig, necessari per proveir les estructures fornàries de combustible vegetal. Al jaciment del Castellot es van documentar diversos elements relacionats amb aquesta indústria, com ara possibles fornals i, evidentment, objectes metàl·lics. Com veurem després, durant l'experimentació arqueològica també es va poder testimoniar la presència, a les immediacions de l'assentament, de mineral de ferro (lemonita). En concret, la proposta preveia la construcció d'un forn de reducció directa de tiratge natural, d'una carbonera aèria i d'un petit espai pels treballs de forja que incloïa una fornal i un altre forn de reducció, de petites dimensions, en aquest cas del tipus "amb fosa per a escòries" i inducció forçada.

Amb aquest objectiu, els tècnics d'ARTIFEX, *crpa* es van desplaçar al jaciment de Bolvir per tal de valorar sobre el terreny on s'havia de dur a terme l'experimentació amb criteris científics, sense deixar de banda els turístics. Finalment, es va determinar que el lloc més idoni per a dur a terme l'activitat seria l'espai obert a la part S de l'edifici del Centre d'Interpretació Ceretània. Es tractava d'una zona amb una pendent idònia tant per desenvolupar l'experimentació pròpiament dita com per acollir un gran nombre de visitants. L'obertura del forn, el punt culminant de l'experiència, es faria servir com a reclam turístic, amb excel·lents resultats, com veurem seguidament.

2.- Descripció general dels forns de reducció directa.

Tècnicament, un forn és una estructura de combustió tancada a l'interior de la qual es sotmeten materials a temperatures elevades amb la intenció d'alterar el seu estat natural i transformar les seves característiques físiques i químiques. En funció de l'ús que se li vulgui donar i de la temperatura que es pretengui assolir, els forns han de ser construïts amb unes determinades característiques que permetin distribuir el més homogèniament possible l'escalfor al seu interior. Els forns de reducció directa de ferro documentats en contextos arqueològics protohistòrics i romans de la Península Ibèrica solen ser estructures construïdes generalment amb argiles, pedres i elements orgànics vegetals, probablement amb forma pseudo- cilíndrica o amb tendència cònica, més amplis i voluminosos a la part inferior i més estrets en la meitat superior. Al seu interior es sotmet el mineral de ferro a altes temperatures dins una atmosfera rica en carboni, alliberat pel carbó, per a separar el ferro pur (Fe) de la resta de components residuals del mineral.

Els forns de reducció directa de l'Antiguitat podien ser del tipus "amb fosa per a escòries" o "amb canal de drenatge d'escòries", és a dir, que les escòries resultants cauen a través d'una cavitat excavada *ex professo* per sota de la cubeta de combustió, o que son evacuades mitjançant una sortida a la part baixa del forn, respectivament. Per al seu correcte funcionament, el forn ha de pre-escalfar-se durant algun temps, en funció de diverses variables com ara l'índex de humitat de l'estructura, l'alçada o la temperatura i la humitat ambientals.

Per obtenir ferro a partir del mineral, s'ha que sotmetre aquest a una reacció química, denominada "reducció directa", a la qual només es pot accedir mitjançant temperatures molt elevades. A partir dels 700 °C, els òxids i hidròxids de ferro comencen a reaccionar amb el monòxid de carboni (CO) que desprèn el carbó vegetal, alliberant diòxid de carboni (CO₂) i aïllant el ferro pur (Fe), tal como es descriu a la següent seqüència resumida: $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$

Aquesta temperatura d'inici de la reducció és encara molt inferior a la temperatura que s'ha d'assolir perquè els altres components de la mena es separin del metall, de l'ordre dels 1.100 °C– 1.200 °C, aproximadament. Quan s'assoleix aquest punt, el ferro es separa de la resta d'elements presents dins el mineral donant lloc a una massa informe on s'hi troben barrejats el ferro metàl·lic i l'escòria, que no és altra cosa que material residual fos.

Per assolir, però sobretot, per mantenir aquets índex tèrmics, els forns han de estar adequadament ventilats, doncs l'oxigen és necessari perquè la combustió no s'aturi. En el cas dels forns de tiratge natural, com el que ens ocupa, aquesta ventilació es produeix de forma mecànica per part del forn, seguint un principi bàsic de la termodinàmica de fluids: l'efecte Bernoulli que podem resumir amb la següent fórmula: $V^2 (D_i - D_e)/2 + P + (D_i - D_e) \cdot G \cdot H = \text{constant}^1$

¹ On V= velocitat de l'aire, D_i= Densitat de l'aire a l'interior, D_e= Densitat de l'aire a l'exterior, P= Presió al conducte de la xemeneia, G= força de la gravetat, H= alçada total de l'estructura.

Sintetitzant, aquest principi determina que a més alçada, més ventilació, doncs l'aire de l'interior del forn, que es troba molt calent, ascendeix per la xemeneia i s'accelera perquè ha de travessar cada vegada un tram més estret fins a sortir per la part superior, com assenyala la següent equació: $A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2^2$. Aquesta acceleració dels gasos produeix una succió d'aire des de l'exterior del forn que hi entra a través de les toveres practicades a la part inferior de l'estructura. Tècnicament, és com si l'aire calent que abandona el forn estirés de l'aire fred de l'exterior. Quan l'aire fred accedeix al forn, s'escalfa ràpidament (durant la reducció es poden assolir temperatures de més de 1350°C) i s'enfila per la xemeneia, provocant una nova succió donant lloc a un cicle que finalitza quan s'acaba el combustible i s'atura el procés de reducció.

² On A= àrea de la secció transversal del conducte, V= velocitat del fluxe de gas que travessa la secció.

3.- Descripció dels treballs de construcció del forn ELONKE.

Els treballs de construcció del forn de reducció es van perllongar durant quatre dies: van començar el dia 29 de juliol i van finalitzar el dia 1 de d'agost de 2016. Com a matèria prima es va fer servir d'una banda, terra argilosa de local (de fet, procedent de les mateixes terreres del jaciment arqueològic) barrejada amb herba tallada i fibres de blat (*Triticum Dicocum*). L'endo- estructura del forn es va aixecar fent servir còdols locals de diverses mides, provinents de la pedrera del jaciment que van ser lligats i recoberts amb argamassa. Per començar, es va aprofitar el desnivell del terreny per a practicar una rasa de reduïdes dimensions sobre la qual s'havia de construir l'estructura de combustió. Aquest element, havia de facilitar l'evacuació de les escòries i l'extracció manual dels possibles massers de ferro, a més de servir com a objecte d'estudi doncs un paral·lel arqueològic documentat al jaciment ibèric del Turó de les Maletes (Montcada i Reixac, Vallès Occidental) havia estat interpretat com a canal d'alimentació d'aire. Com veurem posteriorment, aquest element es va demostrar com a inviable a la pràctica.

Per començar, es va picar un petit negatiu de forma circular, tot respectant la inclinació del terreny. Aquest element constituïa la part inferior de la cubeta de combustió. Posteriorment, deixant un diàmetre intern de 0'45 m, es va construir el perímetre estructural. La seva part inferior, fins els 0'6 m d'alçada, es va aixecar amb una barreja de fang i pedres de grans i mitjanes dimensions (≥ 15 cm de diàmetre), de 0'25 m de gruix, la qual cosa garantia una cubeta resistent tant a les altes temperatures com a les futures esquerdes derivades. Per a poder abocar el mineral, el combustible i descongestionar el conducte durant el procés de reducció, es van habilitar tres esglaons fets amb blocs de pedra pissarra integrats a l'estructura fornària els quals permetien accedir a la boca superior de la xemeneia, a 2,5 m d'alçada. També es van deixar quatre obertures (toveres), orientades en direcció als quatre punts cardinals per aprofitar els vents de totes direccions, amb conductes d'uns 6 cm de diàmetre. Aquest fenomen, que *a priori* no havia estat considerat com a rellevant, es va demostrar, com veurem seguidament com a pràcticament determinant.

Seguidament es va iniciar la construcció de la xemeneia (entesa com la part on simplement s'escalfa i deshidrata el material) amb els mateixos materials. El seu gruix oscil·lava entre els 0'15 m. i els 0'25 m. de paret i els 0'25 i 0'30 m. de diàmetre intern, la qual cosa impediria l'efecte cúpula de la càrrega (és a dir, l'acumulació de material descendent per efecte del fregament amb les parets). L'alçada final del forn va quedar en 2,5 m des de l'interior. Finalment, es va procedir a aplicar una capa refractària preparada amb cendres de faig, fens de cavall y argila depurada mitjançant flotació. Aquesta capa va ser aplicada tant a la paret externa com a la interna, amb un gruix aproximat de 1 cm.

Com a material mineralògic es van utilitzar uns 45 kg de mena procedent de la mina de Rocabrunga (Gavà, Baix Llobregat), compostat per Limonita, Goethita i Hematites. Prèviament a la seva introducció dins el forn, el mineral va ser torrat a uns 600 °C durant varies hores en un foc a terra, amb la intenció de deshidratar- lo i poder fragmentar- lo en nòduls de petites mides tot fent la seva alteració més fàcil

durant el procés reductiu. A la bibliografia específica, aquest procediment apareix sovint esmentat com a "procés d'enriquiment".

El dia 2 d'agost a les 10:40h, es va encendre el forn amb fusta seca de pi roig (*Pinus Sylvestris*) fins a les 17:40 h del dia 4 (és a dir, va estar 31 hores cremant fusta ininterrompudament), moment a partir del qual es va tancar el forn permetent l'entrada d'aire només pels quatre orificis practicats a la base de l'estructura. A continuació es va procedir a omplir la totalitat del forn amb carbó subministrat pels companys de la carbonera d'alzina (*Quercus Ilex*), uns 25 kg. Des d'aquell moment, els arqueòlegs d'ARTIFEX, *crpa* van controlar la càrrega alternativa dels cicles (una mida de carbó i una mida de mineral) fins a esgotar la totalitat de mineral disponible. El procés de reducció es va perllongar de forma continua fins el moment de l'obertura, el dia 7, i només al final, durant les quatre darreres hores, es van implementar dues manxes per introduir aire artificialment tot incrementant notablement l'entrada d'aire a l'interior del forn i, conseqüentment, l'increment tèrmic.

La rasa d'alimentació, com ja hem esmentat, havia de servir hipotèticament, per conduir un gran volum d'aire a l'interior del forn, funcionant com a una tovera gegant. Perquè el seu funcionament fos correcte, havia de quedar totalment hermetitzada, raó per la qual es van col·locar lloses de pissarra tancant la rasa per la seva part superior. Des del principi, ja es va poder observar la dificultat que representaria mantenir la rasa neta, doncs en estar aprofitant la pendent, la càrrega del forn tendia a esllavissar-se cap al seu interior, taponant la possible entrada d'aire. Per solucionar aquest contratemps, es va construir una peça de fang, rectangular, amb cinc orificis circulars que va ser ubicada al punt on la rasa s'introduïa al forn, inutilitzant així la seva suposada funcionalitat. En efecte, en col·locar aquesta peça, l'entrada d'aire a través de la rasa quedava condicionada per la capacitat dels orificis practicats a la peça de fang, fent la rasa esdevenir inútil a la pràctica.

En canvi, la presència durant pràcticament tota l'experimentació de forts corrents d'aire, principalment en sentit NE- SW, va afavorir l'increment tèrmic a l'interior del forn. Com ja hem esmentat, a priori no es valorava aquest fenomen com a determinant, opinió que s'ha demostrat errònia doncs, efectivament, es va poder constatar que la part més calenta de l'estructura (encara que no disposàvem de mitjans tècnics per enregistrar la temperatura interna, si que vam poder prendre l'externa) va ser, precisament, la que havia quedat encarada al vent. Aquest accedia el forn amb tanta força que, en moltes ocasions, va provocar l'aparició de flamarades per la resta d'orificis.

El forn es va obrir públicament el diumenge dia 7 d'agost a les 22.00 h aproximadament, dada que significa que el procés de reducció es va perllongar durant 76 hores de forma continuada, sempre amb una persona pendent del seu funcionament, com a mínim. El públic esperava la sortida d'un masser de ferro de l'interior incandescent del forn. Enfilats a les escales que havien estat construïdes per accedir a la xemeneia, es va buidar l'interior del forn amb l'ajuda d'una eina de ferro. Una quantitat indeterminada de material esponjós va ser extreta del forn i seguidament es van picar una rere l'altra sobre una enclusa lítica que havia estat preparada. Malauradament, no es va examinar

l'interior del forn per les circumstàncies del moment i al matí següent, una inspecció visual va permetre identificar una bona part de material que havia quedat adherit al forn. Aquest material contenia una alta proporció de ferro metàl·lic tal com vam poder comprovar amb posterioritat.

Per tant, podem considerar que l'experiència científica va ser un èxit donat que vam aconseguir l'objectiu inicial, a més d'augmentar els nostres coneixements pel que fa a la dinàmica dels forns de reducció directa. Malauradament, no es disposava de cap eina per documentar el registre tèrmic, raó per la qual desconeixem l'evolució interna de l'estructura. Tanmateix, la identificació de la coloració de les flames amb determinades temperatures que havíem observat en d'altres experimentacions, ens permet afirmar que tot el procés de reducció es va desenvolupar en un marc tèrmic que probablement oscil·lava entre els 850°C i els 1000°C, tot i que probablement, aquesta dada caldria revisar-la a l'alça doncs les esponges obtingudes permeten pensar que el registre va arribar als 1.200°C aproximadament. Dins la matriu s'observen grans nòduls de metall pur immersos en nuclis escoriàcics ferro- magnètics, la qual cosa significa que amb una mica més de temps, s'hauria pogut optimitzar el rendiment del forn.

Una observació interessant és que amb aquest experimentació es pot plantejar com a plausible que la productivitat dels forns de tiratge natural és major quan més combustible i mineral es fa servir, a diferència dels forns d'inducció forçada, on l'aportació de l'aire amb l'assistència de manxes permet tenir sota control la temperatura del forn. Els forns de tiratge natural, en ser més voluminosos basen la seva productivitat en la quantitat de mineral, doncs la seva rendibilitat és menor, i bona part del mineral quedarà sense alterar (per les dimensions del forn, per les temperatures més baixes, etc). I efectivament, aquest fenomen és el que s'observa als forns africans d'aquest tipus que encara funcionen (amb quantitats absolutament brutals de 250 kg de mena i 400 kg de carbó) i que donen quantitats de ferro de l'entorn del 10%, i el que es desprèn de les escòries faialítiques (ferro- magnètiques) molt presents als registres arqueològics protohistòrics. Tot i que normalment aquestes escòries eren rebutjades, podrien haver-se fet servir novament en d'altres reduccions donat el seu alt contingut en ferro.

A nivell turístic, es pot considerar l'experiència també com un èxit, doncs unes 250 persones van visitar la zona d'experimentació el diumenge a la tarda (i alguns més que es van haver de quedar fora). No s'ha d'oblidar, però, que nombroses persones van apropar-s'hi també al llarg de tota la setmana interessats en conèixer la forma en que s'obtenia el ferro durant l'Antiguitat i fins ben entrada l'Edat Mitjana. Així, van poder apropar-se a la disciplina de l'arqueologia experimental i la metal·lúrgia antigues, però també als principis físics i químics que es donen a l'interior dels forns de reducció.

4.- Consideracions finals

Com ja hem tingut l'oportunitat de constatar en d'altres ocasions, la combinació d'arqueologia experimental (ciència) i recreació històrica (entreteniment) han esdevingut un excel·lent reclam turístic que ha superat totes les expectatives de l'organització. Per tant, creiem que s'ha de fer una valoració molt positiva. Gràcies a aquesta activitat hem apropat la gent a disciplines aparentment tan allunyades entre si com ara l'arqueologia, la geologia, la física i la química doncs totes estan presents en aquest projecte.

En aquest sentit, creiem que s'ha de continuar amb la realització de noves activitats al voltant d'aquests dos pilars. En cas concret que recull aquesta memòria, creiem que en tractar-se d'una disciplina tan desconeguda i tan allunyada de l'abast del públic general com és la siderúrgia antiga, l'interès de públic ha estat notable.

D'altra banda, amb la construcció d'aquest forn s'amplia el discurs didàctic sobre la producció de ferro durant l'Antiguitat, donant una idea més aproximada de la producció de ferro al jaciment del Castellot, on s'han trobat importants evidències relatives l'activitat poli-metal·lúrgica, entre les quals s'han d'esmentar les escòries de ferro. A més, al jaciment s'han trobat també petits filons de limonita, raó per la qual no descartem que la producció de ferro en aquest assentament es pogués mantenir a partir del mineral local.

També cal destacar la possibilitat de dur a terme futures experimentacions amb aquest forn no necessàriament dins l'àmbit públic sinó també dins l'àmbit científic privat. Un cop cuites, aquestes estructures poden ser reutilitzades diverses vegades, fins esgotar les seves propietats físiques o arribar al seu enderrocament fortuït.

5.- Annex fotogràfic



Fig. 1.- Diversos moments de la construcció del forn de reducció directa ELONKE



Fig. 2.- Diverses imatges del procés constructiu del forn



Fig. 3.- El forn durant el procés de reducció



Fig. 4.- L'èxit de la proposta queda palès tant dins l'àmbit turístic com dins l'àmbit científic.



Fig. 5.- La carbonera aèria amb fusta d'alzina va esdevenir l'altre gran atractiu turístic.

6. Bibliografia

Auladell, J., Simon, J. (1997): Anàlisi metal·logràfica d'elements fèrrics pre- romans: una aproximació als mètodes siderúrgics a la Laietània, *Pyrenae*, 28, 119- 132.

Barrasetas, E., Morer, J., Rigo, A. (1997): Les intervencions arqueològiques a l'autopista A-16: valoració de conjunt, *Tribuna d'Arqueologia 1996-1997*, 67-98.

Cleere, H., F. (1971): Ironmaking in a Roman furnace, *Britannia* 2, 203- 217.

Crew, P. (1991): The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron, *Historical Metallurgy* 25/1, 21- 36.

Decombeix, P.- M., Domergue, C., Fabre, J.- M., Gorgues, A., Tollon, F., Tournier, B. (2000) : Réflexions sur l'organisation de la production du fer a l'époque romaine dans le bassin supérieur de la Dure, au voisinage des MArtys (Aude), *Gallia*, 23- 36.

Decombeix, P. M., Fabré, J. M., Rico, Ch. (2001): Expérimentations de réduction directe du fer dans des reconstitutions des bas-fourneaux romains de la Montagne Noire, en *Actes del 1er Simposi sobre la Minería i la Metal·lúrgia antiga al sud-oest europeu* (Centre d'Arqueologia d'Avinganya, Seròs, 5 al 7 de mayo del 2000), 185- 194.

Dubois, C. (2002) : Elements sur l'origine du fer en Ariège: Le site de Lercoul, en *Actes del 6è curs d'arqueologia d'Andorra*, del 2 d'octubre al 5 d'octubre de 2000, L'obtenció del ferro pel procediment directe entre els segles IV i XIX, Govern d'Andorra, 176- 188.

Dunikowsky, M. Cabboï, S. (1995): La sidérurgie chez les Sénon: les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne), *Documents d'Archéologie Française* 51, Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Fabré, J. M., Polo, C., Rico, Ch., Villagordo, C. (2011): Minería y siderurgia antigua en Sierra Menera (Teruel-Guadalajara), *Nuevos avances de la explotación del hierro en época antigua (siglos II a. C. - II d. C.)*, Orejas, A. y Rico, Ch. (eds.) *Minería y Metalurgia antiguas. Visiones y revisiones*, Casa de Velázquez, Madrid, 43- 62.

Ferrer, M. A. (2000): La metalurgia ibérica del hierro. Una aproximación a través de la interpretación arqueométrica, en Mata, C., Pérez, G. (ed.), *Ibers. Agricultors, artesans i comerciants. III Reunió sobre Economia en el Món Ibèric*, SAGVNTUM Extra- 3, Universitat de València, 283- 290.

Fluzin, Ph., Ploquin, A., Serneels, V. (2000): Archéométrie des déchets de production sidérurgique. Moyens et méthodes d'identification des différents éléments de la chaîne opératoire directe, *Gallia*, 57, 1- 158.

Gallego, J. M. (2013): La siderurgia ibérica. Primeros datos a partir de la experimentación arqueológica, en Palomo, A., Piqué, R. y Terradas, X. (ed.) *Experimentación en arqueología. Estudio y difusión del pasado*, Serie Monográfica del MAC, Girona 2013, 349-356.

- (en prensa): Experimentando con armas ibéricas de hierro (I). La obtención del metal en hornos de "tiro natural", *Gladius*, vol 34, CSIC, Madrid.

Gómez, P. (1996a): Análisis de las escorias férreas: nuevas aportaciones al conocimiento de la siderurgia prerromana en España, *Trabajos de Prehistoria*, 53, nº 2, 145-155.

- (1996b): La tecnología de fundición de metales en la Pre y Protohistoria de la Península Ibérica. Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.

Joosten, I. (2004): Technology of Early Historical Iron Production in the Netherlands, *Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies*, vol. 2, Vrije Universiteit in Amsterdam, Amsterdam.

Keesmann, I., Niemeyer, H., Briese, Ch., Golschani, F., Schultz- Dobrik, B. (1989): Un centro primitivo de la elaboración de hierro en la factoría fenicia de Toscanos en Domergue, C. (coord.): *Minería y Metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas, Coloquio Internacional Asociado, Madrid, 24- 28 octubre de 1985*, 99- 108.

Mangin, M. (dir.) (2004): *Le fer*, Col. Archéologiques, Errance, Paris.

Martín, A., López, V., Gabaldón, A. (2003): El conjunto minero- metalúrgico del término municipal de Senó (Bajo Aragón): un ejemplo del origen y la difusión de la siderurgia protohistórica en el levante español, *Salduie* 3, 257- 267.

Mata, C., Moreno, A., Ferrer, M. A. (2009): Iron, Fuel and Slags: reconstructing the Ironworking Process in Iberian Iron Age (Valencian Region), *Pyrenae* 40, vol. II, 105- 127.

Mommersteeg. P.: Metallurgy and the Development of Etruscan Civilisation, Dissertation submitted for the negree of MPhil, Ancient History, University College, London, supervised by Crawford, M. Inédito.

Morer, J. *et alii* (1996): Les intervencions arqueològiques a l'autopista A- 16: valoración de conjunt, *Tribuna d' Arqueologia*, Departament de Cultura, Generalitat de Catalunya, 67- 99.

- (1999): Ferro i ferrers en el món ibèric. El poblament ibèric de les Guàrdies (El Vendrell), Aucat.

Rehder, J. E. (2000): The mastery and uses of fire in Antiquity, McGill-Queen's University Press Montreal, Canadá.

Renzi, M., Rovira, S. (2005): Escorias metalúrgicas del yacimiento fenicio de La Fonteta (Alicante). Estudio preliminar, en *Avances en Arqueometría*, Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría, Universitat de Girona, 163- 171.

Rigo, A., Morer, J. (2003): Les Guàrdies (el Vendrell, Baix Penedès). Un assentament metalúrgic d'època ibèrica, *Territoris antics a la Mediterrània i a la Cossetània oriental*, 327- 338.

Rovira, M. C. (2008): Tecnología de las primeras manufacturas férricas en el noreste de la Península Ibérica, en Rovira *et alii* (eds), *Actas del VII Congreso Ibérico de Arqueometría*, Madrid del 8 al 10 de octubre de 2007, 458- 467.

- (2012): La producció siderúrgica en època ibèrica a Catalunya, *Boscos de Ferro, Actes de les Primeres Jornades de Recerca i Desenvolupament de la Vall Ferrera*, Garsineu Edicions, Tremp, 41- 50.

Rovira, S., Burillo, F. (2005): Experimentos de fundición de hierro en la Ciudad- Estado celtibérica de Segeda en *Avances en Arqueometría*, Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría, Universitat de Girona, 137- 143.

Rovira, S., Montero, I., Gómez, P. (2002): Metalurgia celtibérica en el poblado de El Ceremeño, en Cerdeño, M. L. y Juez, P. (ed.): *El Castro celtibérico de El Ceremeño (Herrería, Guadalajara)*, Anexo IX, 169- 177.

San José, S., Renzi, M., Rovira, S. (2007): Caracterización de materiales férricos procedentes de poblado protohistórico de Basagain (Guipuzkoa, Euskal Herria). Estudio preliminar, en Actas del VII Congreso Ibérico de Arqueometría, Madrid, 8 al 10 de octubre de 2007, 490-499.

Sarabia, F. J. (1994): Aproximación teórica y metalográfica a la reducción de hierro en la Prehistoria partiendo del trabajo experimental, *Trabajos de Prehistoria* 51, nº 1, 95- 109.

Serneels, V. (1997): L'estudi dels rebutjos metal·lúrgics i la seva aportació a la comprensió de la indústria del ferro, revista Cota Zero, 13, Vic, pp. 29- 42.

Tylecote, R. F., Austin, J. N., Wraith, A. E. (1971): The mechanism of the bloomery process in shaft furnaces, *Journal Iron Steel Institute* 209, 342- 363.